

Aplicación de tecnologías avanzadas del hormigón en las pasarelas en cáscara sobre el río Manzanares para el proyecto Madrid Río

Advanced concrete technologies implementation in shell footbridges over Madrid river in MRio Project

Revista de Obras Públicas
nº 3.515, Año 157
Noviembre 2010
ISSN: 0034-8619
ISSN electrónico: 1695-4408

Hugo Corres Peiretti, Profesor Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos

FHECOR Ingenieros Consultores (España). hcp@fhecor.es

Carmela Seijo Veiguela, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Jefe de Obra de ACCIONA Infraestructuras, Dirección de Zona de Madrid (España). msejov@acciona.es

José Daniel García Espinel, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Director del Departamento de Implantación e Innovación, Dirección de I+D+i de ACCIONA Infraestructuras (España).
jgarcia4@acciona.es

Ignacio Calvo Herrera, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Director del Departamento de Investigación y Desarrollo, Dirección de I+D+i de ACCIONA Infraestructuras (España).
icalvoh@acciona.es

Javier Grávalos Moreno, Físico.

Jefe de Grupo del Área de Materiales Avanzados, Dirección de I+D+i de ACCIONA Infraestructuras (España).
jgravalo@acciona.es

Valle Chozas Ligero, Licenciada Química.

Técnico Investigador del Área de Materiales Avanzados, Departamento de I+D, Dirección de I+D+i de ACCIONA Infraestructuras (España). vchozas@acciona.es

Rosa Lample Carreras, Licenciada Química.

Técnico Investigador del Área de Materiales Avanzados, Departamento de I+D, Dirección de I+D+i de ACCIONA Infraestructuras (España). rlample@acciona.es

Andrés Viñolo Albione, Ingeniero Técnico Aeronáutico.

Jefe de Obra del Departamento de Implantación, Dirección de I+D+i ACCIONA Infraestructuras (España).
avinolo@acciona.es

Resumen: ACCIONA Infraestructuras ha construido para el Proyecto Madrid Río dos pasarelas tipo cáscara. Dichas pasarelas se caracterizan por tener una cubierta con doble curvatura de dimensiones 49,08 m de longitud, y una luz entre apoyos de 43,46 m. En esta obra la Dirección de I+D+i de ACCIONA ha aplicado con notable éxito dos tecnologías de Materiales Avanzados: la aplicación de hormigón autocompactante en condiciones extremas de temperatura y el desmoldado rápido de estructuras mediante equipos de control de madurez, ambas tecnologías desarrolladas en el Centro de I+D+i de ACCIONA en Madrid.

Palabras Clave: Hormigón; Autocompactante; Madurez; I+D+i; ACCIONA

Abstract: Two shell footbridges for the MRio (Madrid river) has been built by ACCIONA Infraestructuras. These footbridges are characterized by a double curvature cover with 49.08 m span, and 43.46 m platform span. In this site, the ACCIONA R&D Department has implemented with great success two technologies of Advanced Materials: Application of self-compacting concrete in extreme conditions of temperature and quick formwork removal structures applying the concrete maturity control technology, both technologies developed in the ACCIONA R&D Technological Center in Madrid.

Keywords: Concrete; Self-Compacting concrete; Maturity; R&D; ACCIONA

1. Descripción general de la obra

La obra consiste en la construcción de dos pasarelas peatonales. Dichas pasarelas son iguales y se sitúan en el entorno del Invernadero y Matade-

ro existentes, en el barrio de la Arganzuela (Madrid).

Constan de un tablero mixto y una cubierta de hormigón armado en forma de cáscara revestida interiormente con un mosaico vítreo. El tablero, está



Fig. 1. Hormigonado tablero.



Fig. 2. Encofrado superior.

constituido por una estructura de vigas metálicas y una losa de hormigón, y va colgado de la cubierta, que se decidió hormigonar in situ con hormigón autocompactante (HAC).

Las dos estructuras están constituidas por:

- Un tablero de paso peatonal, realizado mediante estructura mixta, principalmente de vigas metálicas de acero laminado S275 J2G3, encofrado perdido de chapa de acero y losa de hormigón armado HA-30 de 10 cm de espesor y una capa superior de micro aglomerado asfáltico. Dicho tablero va colgado de la cubierta mediante unas péndolas formadas por cables de acero galvanizado helicoidal de 8,1 mm de diámetro postesados.
- Una cubierta en forma de cáscara de hormigón armado in situ con HA-40 autocompactante coloreado, mediante encofrado de madera y revestida interiormente por un mosaico mural a base de piezas de 8x8 de mosaico vítreo, según diseño del artista (Daniel Canogar).

Las pasarelas apoyan en estribos de hormigón HA-25 en los que se han ejecutado micropilotes de acero Ø139mm y espesor 9mm con perforación de Ø225mm. Cada pasarela tiene una longitud en su eje de 49,08m, y una luz entre apoyos de 43,46m.

La construcción de estas pasarelas mejorará las comunicaciones peatonales a ambos lados del río contribuyendo además a la supresión de barreras arquitectónicas.

Fig. 3. Encofrado inferior.



2. Introducción HAC

El hormigón autocompactante (HAC) es uno de los materiales de construcción con mayor proyección y futuro dentro del sector. Son aceptados los beneficios que el HAC ofrece en el caso de la ejecución de estructuras complejas o con alta densidad de armadura. Sin embargo, el empleo del HAC también puede aportar significativas ventajas en la ejecución de las denominadas estructuras convencionales. Se puede definir como aquel hormigón que es capaz de fluir en el interior del encofrado, rellenándolo de forma natural, pasando entre las barras de armadura y consolidándose únicamente bajo la acción de su propio peso (Okamura, 1997). Según la EHE-08 (Anejo 17), se define como un hormigón autocompactante, aquel hormigón que, como

consecuencia de una dosificación estudiada y del empleo de aditivos superplastificantes específicos, se compacta por la acción de su propio peso, sin necesidad de energía de vibración ni de cualquier otro método de compactación, no presentando segregación, bloqueo de árido grueso, sangrado, ni exudación de la lechada.

La idea original de este tipo de hormigón fue propuesta por Okamura (1986) con la intención de solucionar los problemas de durabilidad en las estructuras de hormigón armado, que se habían detectado y que se atribuían a una disminución en los niveles de calidad de mano de obra especializada para la ejecución de los procesos de compactación. El objetivo era crear un producto que garantizase la compactación, sin que el factor humano fuera una variable capaz de afectar al producto final. Por lo tanto, un HAC tendrá las siguientes propiedades fundamentales:

- Alta fluidez o capacidad de relleno (*flowability o filling ability*): habilidad del HAC para fluir dentro del encofrado y rellenarlo bajo su propio peso, garantizando una cobertura total de la armadura.
- Habilidad de paso (*passing ability*): es la facilidad del HAC para fluir a través de obstáculos tales como el espacio libre entre las barras de armadura o zonas estrechas del encofrado, sin bloquearse.
- Estabilidad frente a la segregación (*segregation resistance o stability*): el HAC debe conseguir las dos características anteriores conservando su composición uniforme durante el proceso de transporte y colocación.

3. Ventajas del HAC

Las principales ventajas del HAC serán aquellas relativas a los aspectos técnicos y mecánicos, aunque existen también prestaciones a nivel económico, medio-ambiental, de seguridad y salud. Además de las ventajas económicas en cuanto a la reducción de costes en maquinaria y reducción de los plazos de entrega. Citándose todas ellas a continuación.

3.1. Ventajas técnicas

Se logra disminuir los requisitos especiales para la formulación compleja de la mezcla por parte de los trabajadores a la hora de la obtención de las compactaciones adecuadas. Se consiguen resistencias mecánicas elevadas gracias a su especial formulación (que contendrá un alto porcentaje de partículas finas, tanto en adición como en cemento). Aumenta la posibilidad de ejecutar proyectos más exigentes en lo que respecta al diseño, pudiendo llevar a cabo formas geométricas complejas. Mayor calidad de los elementos hormigonados, evitando problemas ocasionados por una compactación inadecuada. En el sector de la prefabricación se aumenta la vida útil de los moldes, pueden ser mas ligeros, y se reduce el tiempo y esfuerzo necesarios.

3.2. Ventajas económicas

A pesar de tener un coste de material mayor que el hormigón tradicional, es posible:

- Disminuir el personal necesario para el vertido y vibración (como consecuencia de la propiedad



Fig. 4. Capacidad de relleno.



Fig. 5. Habilidad de paso.



Fig. 6. Resistencia a la segregación.

autocompactante), y por tanto asumir un menor coste.

- Prescindir de los equipos asociados a la compactación, ahorrando en coste de maquinaria. Reducir considerablemente los plazos de ejecución debido a su elevada fluidez y habilidad de paso (especialmente en estructuras monolíticas tipo muro o losa).

3.3. Ventajas medioambientales y de seguridad y salud

Al eliminar la fase de vibrado se reducen los ruidos generados por esta tarea, especialmente importante en plantas de prefabricación y obras en entornos urbanos.

Se reducen notablemente los riesgos laborales imputables a la compactación puesto que la vibración necesaria para compactar el hormigón convencional es eliminada. Se evita la aparición en los operarios de dolor, fatiga, falta de concentración, etc. Se genera menor consumo energético.

Por lo tanto, la mejora en el ambiente de trabajo como consecuencia del uso de HAC significa un valor añadido en términos de la eficacia en la construcción, ya que la productividad puede aumentar de manera importante.

4. Metodología dosificación del HAC

En general, se siguen las pautas planteadas por el Anejo 17 de la normativa EHE - 08. Los investigadores del área de Materiales del Centro Tecnológico de ACCIONA Infraestructuras han desarrollado un procedimiento propio para el análisis y diseño de un HAC, optimizando sus propiedades y coste y asegurando su aplicabilidad incluso en condiciones de altas temperaturas. Este procedimiento consta, de forma general, de las siguientes etapas:

- Caracterización de los componentes del HAC, análisis de la compatibilidad físico-química entre ellos, optimización de la pasta de cemento, optimización del esqueleto granular y análisis a nivel de matriz de hormigón.

En cuanto a la caracterización y análisis de los componentes del HAC, se analizan los mate-

riales de partida y la compatibilidad química-física entre los materiales usados en la fabricación del HAC. También, se estudia el mantenimiento de la trabajabilidad en el tiempo. En este caso, una de las propiedades a tener en cuenta es la composición química del cemento, contenido de AC3 y C4AF. Para igual trabajabilidad, se requiere una mayor dosificación de aditivo en cementos tipo CEM I (con altos contenidos de C3A) que en aquellos que contienen menos clinker (CEM II o CEM III), ya que la mayor parte del aditivo se adsorbe sobre esta fase. Además, la velocidad de adsorción también depende de las relaciones C3S/C2S y C3A/C4AF, de manera que al aumentar éstas aumenta la cantidad de aditivo adsorbido en el caso de los naftalenos. También se tiene en cuenta la influencia de la finura del cemento: la adsorción de aditivo, aumenta al incrementar la finura del cemento, y la influencia de la temperatura. A partir de 30°C se produce una disminución grande de la trabajabilidad en el tiempo, lo que hace imprescindible controlar la dosificación en estos casos. La cantidad de superfluidificante adsorbido sobre las fases prehidratadas es menor que sobre las anhidras, quedando más superficie libre para dispersar C3S y C2S. La siguiente pauta que se sigue es, desarrollar un protocolo de ensayos para optimizar una dosificación de HAC. Se puede realizar en dos fases: análisis y optimización de la pasta de cemento y por otro lado, análisis y optimización del esqueleto granular.

Fig. 7. Ensayo del Cono de Marsh.



4.1. Optimización de la pasta de cemento

A través del ensayo del cono de Marsh, se obtiene la saturación del aditivo súper plastificante (SP) con respecto al tipo de cemento escogido. De esta forma, comprobamos la compatibilidad del aditivo con el cemento. Posteriormente, para obtener la dosificación óptima de finos para un hormigón autocompactante, se realiza el ensayo del mini-cono con una pasta de fluidez alta y cohesión moderada. Finalmente con el ensayo del cono de Marsh se ajusta el % óptimo de aditivo SP en la pasta compuesta de agua, cemento, SP y filler.

El ensayo del cono de Marsh es un procedimiento rápido y sencillo para evaluar la fluidez de pastas de cemento y para determinar la dosis de saturación de plastificantes y superplastificantes, así como la compatibilidad entre cemento y el aditivo. Este ensayo es similar

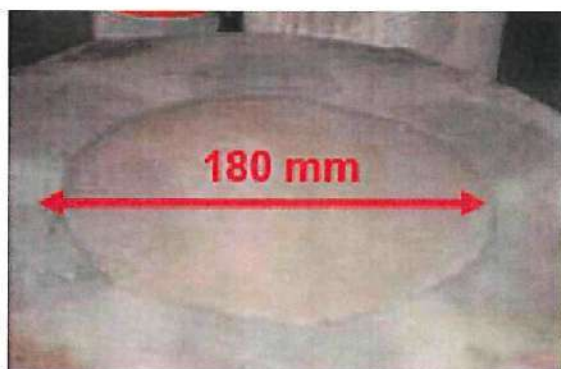


Fig. 8. Diámetro máximo de flujo.



Fig. 9. Ensayo de escurrimiento.

al descrito en la norma ASTM C939-87 para la verificación de la fluidez de morteros.

El hormigón autocompactante requiere una cantidad alta de finos, una de las formas de fijar la relación filler/cemento es a través del ensayo del mini-cono.

Se realizan análisis a través de los cuales se obtiene un esqueleto granular continuo y con menor índice de vacíos.

4.2. Ensayos a nivel de matriz de hormigón

La dosificación del HAC obtenida con la metodología anteriormente descrita, debe cumplir tres propiedades: capacidad de fluir y rellenar, habilidad de paso entre armaduras y resistencia a la segregación. Los ensayos más representativos para la caracterización de la autocompactabilidad del hormigón, son los reflejados en la tabla 1.

Clases de escurrimiento:

- AC-E1: $550 \text{ mm} \leq df \leq 650 \text{ mm}$
- AC-E2: $650 \text{ mm} \leq df \leq 750 \text{ mm}$
- AC-E3: $750 \text{ mm} \leq df \leq 850 \text{ mm}$

Tabla 1. Ensayo escurrimiento: según UNE 83.361

Método de ensayo	Características
Medidas Escurrimiento (UNE 83.361)	Fluidez. Secundariamente permite verificar: Resistencia a la segregación y exudación (estabilidad). Resistencia a la migración del aire.
Escurrimiento con anillo (UNE 83.362)	Capacidad de paso entre barras de armadura. Resistencia a la segregación y exudación (estabilidad).

En general la autocompactabilidad AC-E1 se recomienda en los siguientes casos: estructuras no muy fuertemente armadas, estructuras en las que el llenado de los encofrados es sencillo.

Anillo japonés: según UNE 83.362



Fig. 10. Ensayo anillo japonés.

Requisitos generales para la autocompactabilidad

Tabla 2. Especificaciones generales de los HAC

ENSAYO	PARÁMETRO MEDIDO	RANGO ADMISIBLE	
		MÍN	MÁX
Escurrimiento	T50 (s) df (mm)	2 550	8 850
Escurrimiento con anillo japonés	djf-df (mm)	-	50

df: diámetro final de la extensión de flujo, expresado en milímetros con una precisión de $\pm 5 \text{ mm}$, determinado por la media aritmética de dos diámetros perpendiculares.



Fig. 11. Perímetro de la "torta" sin exudación.

T50: tiempo transcurrido en segundos en alcanzar la extensión de flujo de 50 cm.

djf: diámetro final de extensión de flujo con el anillo japonés, expresado en milímetros con una precisión de ± 5 mm, determinado por la media aritmética de dos diámetros perpendiculares.

Hay que destacar, que aunque un hormigón autocompactante cumpla con los requisitos generales de la autocompactabilidad, hay que analizar visualmente en conjunto la aparición de segregación y exudación en el perímetro de la "torta" final de ensayo.

5. Nuevos desarrollos HAC

Desde el Centro Tecnológico de I+D+i de ACCIONA Infraestructuras, se han desarrollado y optimizado otros tipos de HAC especiales, tales como: HAC ligero, HAC sin adición de filler, HAC de alta resistencia, HAC con fibras, etc. Todo ello para dar solución a problemas en la aplicabilidad del HAC, reducir costes y asegurar un mayor uso de este prometedor material en las obras de ACCIONA.

En cuanto al HAC ligero, cabe destacar que uno de los problemas del hormigón ligero, es la segregación negativa en virtud de la cual los áridos de mayor tamaño y menor densidad tienden a ocupar posiciones más altas en la masa, este efecto es particularmente intenso cuando se vibran los hormigones. Se ha demostrado que los hormigones ligeros se bombean con gran dificultad mediante bombas convencionales, no consiguiéndolo la mayoría de las veces. Esto se debe al bajo peso del árido, que queda flotando en la tolva de la bomba.



Fig. 12. Ensayo de escurrimiento. HAC ligero.

Otro problema que suele aparecer en los hormigones ligeros es el vibrado, ya que debe ser muy leve para que no se produzca la segregación del árido ligero, que subiría con facilidad a la superficie.

El hormigón autocompactante ligero optimizado en el Centro Tecnológico de I+D+i de ACCIONA Infraestructuras, posee mayor cohesividad que un hormigón ligero convencional, por lo que se previene la aparición del efecto de la segregación, muy común en hormigones ligeros convencionales.

En el caso de HAC sin aportación de filler, hay que resaltar la complejidad de conseguir un HAC-30 debido a que en general se necesita alta cantidad de finos (cemento y/o filler o adiciones) para conseguir una reología adecuada. El empleo de altos contenidos de cemento, el empleo de adiciones o filler implican la necesidad de disponer silos extra, además de un mayor control de calidad que, finalmente, repercuten negativamente en el coste del hormigón y cuestionan su rentabilidad. Los hormigones HAC-30 MPa son adecuados para estructuras con baja densidad de armadura. Para obtener este tipo de HAC los investigadores del centro de ACCIONA I+D+i han incorporado a la matriz de hormigón un nuevo tipo de aditivo químico basado en la correcta dispersión y dosificación de nanopartículas en su composición, que actúa mejorando la reología y cohesión de la matriz, a la vez que aportan la fluidez y resistencias necesarias para que se cumplan las propiedades generales de la autocompactabilidad.

En cuanto al HAC de alta resistencia se han diseñado innovadoras dosificaciones con distintos tipos de fillers que aportan mayor reactividad química y compacidad a la matriz de hormigón. Lo que se traduce en mayores resistencias mecánicas.



Fig. 13. Ensayo del anillo japonés. HAC con fibras. HAC coloreado con pigmento rojo.

Además se han diseñado dosificaciones de HAC con fibras de acero. Se han analizado las propiedades generales de la autocompactabilidad, acabado superficial final, vertido, resistencias mecánicas, etc. A escala industrial y en colaboración con la Universidad Politécnica de Madrid para el proyecto HABITAT 2030, se desarrollaron 4 tipos de HAC con fibras. En la imagen anterior, se muestra un tipo de HAC analizado con fibras de acero.

6. Aplicación del HAC en las pasarelas del río Manzanares (M-30 Madrid)

En el caso concreto del proyecto Madrid Río, ACCIONA Infraestructuras ha llevado a cabo la construcción de dos pasarelas en forma de cáscara

con HAC coloreado con pigmento negro en el río Manzanares. Dada la complejidad de la estructura de la pasarela, se pensó en la conveniencia del uso del HAC.

Desde el Centro Tecnológico de I+D+i de ACCIONA Infraestructuras de Madrid, dado el profundo conocimiento de este material se actuó en los siguientes asuntos: se proporcionó apoyo técnico en el conocimiento del HAC, se analizaron las posibles plantas de hormigón a contratar y se participó en los ensayos para la optimización de la dosificación requerida (HAC-40 de coloración negra). Se desarrolló un protocolo de control de calidad del hormigonado de las pasarelas a pie de planta y de obra. Además se evaluaron las resistencias a la rotura a compresión a edades a horas tempranas a través del método de la madurez del hormigón.

6.1. Análisis de las plantas de hormigón

Se analizaron tres plantas de hormigón propuestas. Para asegurar una óptima fabricación del HAC y una buena reproducibilidad del mismo, se tuvieron en cuenta las propiedades de la planta como el control de la cantidad de agua, el control del amasado, el control de la granulometría de los áridos, la calidad y el almacenaje en acopios, etc.

Se analizaron las dosificaciones de HAC diseñadas por cada planta. Se examinaron propiedades como el tipo de cemento y composición química del mismo, relación a/c, tipos de áridos, etc. Debido a que una de las pasarelas se ejecutó en verano a



Fig. 14. Estructura pasarela. Doble encofrado de madera.



Fig. 15. Mezcla de arena y grava en la cinta transportadora.



Fig. 16. Ensayo de escurrimiento en planta.



Fig. 17. Ensayo del anillo japonés: 66 cm de diámetro máximo.



Fig. 18. Ensayo escurrimiento: 68,5 cm de diámetro máximo.

temperatura ambiente mayor de 30°C, se optó por la dosificación que generaba menor calor de hidratación en el tiempo, acorde al protocolo de diseño propio de ACCIONA. De esta forma se prevenía la posible aparición de fisuras en el hormigón debidas a las altas temperaturas generadas en el interior de la matriz del hormigón.

Una vez que se seleccionó la planta de hormigón, se realizaron ensayos para optimizar y adecuar la dosificación del HAC a las necesidades requeridas en cuanto a fluidez, mantenimiento de la trabajabilidad, acabado final superficial y resistencias mecánicas. Para conseguir una dosificación con la reología y fluidez necesaria, se utilizó filler calizo como aporte de finos. Además se usaron dos aditivos químicos, un plastificante para mantener la trabajabilidad del hormigón en el tiempo, y un superfluidificante de última generación que aporta fluidez a la matriz.

6.2. Ensayos

A nivel de planta se realizaron ensayos para medir las propiedades de la autocompactabilidad, como el ensayo de escurrimiento y anillo japonés.

A pie de obra también se analizaron las propiedades de la autocompactabilidad a través de los ensayos de escurrimiento y anillo japonés. Dichos ensayos, también sirvieron para medir la pérdida de consistencia que se producía con el transcurso de tiempo de cada planta a la obra. Además se fabricaron probetas para medir la resistencia a la rotura a compresión para comprobar que se cumplieran los requerimientos fijados por la Dirección de Obra.

Para analizar la puesta en obra del HAC, el vertido y el acabado superficial final, se fabricaron estructuras de tipo "mockup". También se analizó la coloración requerida por la dirección de la obra.

Debido a que una las pasarelas se hormigonó en verano, a elevadas temperaturas, exista la posibilidad de la aparición de fisuras en el hormigón endurecido y la pérdida de la autocompactabilidad por efecto de la temperatura. Por lo que previamente se analizó la evolución de la temperatura desarrollada por la matriz de hormigón utilizando dos termopares. Uno de los termopares se puso en la parte de arriba de la estructura de tipo "mockup" y el otro en la parte baja.

Fig. 19. Acabado superficial final pasarela.

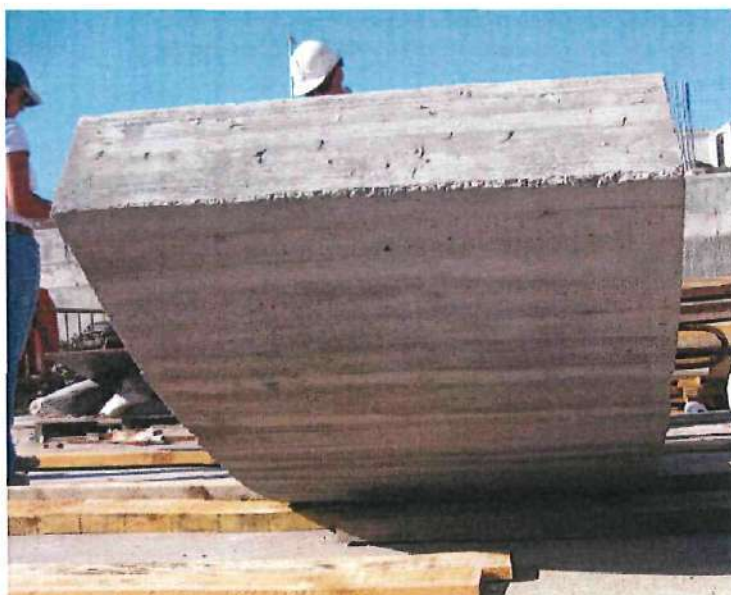




Fig. 20. Termopolar colocado en la parte de arriba.

6.3. Control de calidad hormigonado de las pasarelas

Se diseñó un protocolo de actuación y un control de calidad del HAC para la puesta en obra, tanto a nivel de planta de hormigón como a pie de obra. Se analizaron las propiedades de la autocompactabilidad del HAC a través de los ensayos de escurrimiento y anillo japonés. Se descartaron los HAC que no cumplían los requerimientos fijados de diámetro de escurrimiento y anillo japonés en el protocolo de actuación.

Se obtuvo un buen acabado superficial final. En la siguiente imagen, se muestra el acabado final de la parte de arriba de la pasarela cuando fue desencofrada.



Fig. 21. Ensayos realizados a nivel de planta y a pie de obra.



Fig. 22. Estructura final pasarela M-30.



Fig. 23.
Acabado
superficial final
pasarela.

6.4. Evaluación de la resistencia. Método de la madurez

Para una comprobación más exacta de la evolución de la resistencia real del hormigón in situ, se aplicó el protocolo de estimación de las propiedades mecánicas del hormigón en base a su madurez, desarrollado por la Dirección de I+D+i de ACCIONA Infraestructuras, en la obra "Pasarelas M30".

Para tal fin, se realizaron una serie de probetas cilíndricas que conectadas mediante sensores de temperatura a un equipo especial y a una probeta patrón, aseguraron que las primeras estuvieran a la misma temperatura in situ que el hormigón de la pasarela. Las probetas se fabricaron con el hormigón de la última cuba garantizando que los resultados corresponden a las menores resistencias.

La madurez del hormigón es un parámetro intrínseco a la mezcla del hormigón, de tal forma que dos muestras del mismo hormigón que tengan igual madurez, aunque posean distinta edad, tendrán las mismas propiedades mecánicas.

Para el cálculo de la madurez, se empleó la teoría de Nurse - Saul que de forma simplificada se enuncia como sigue:

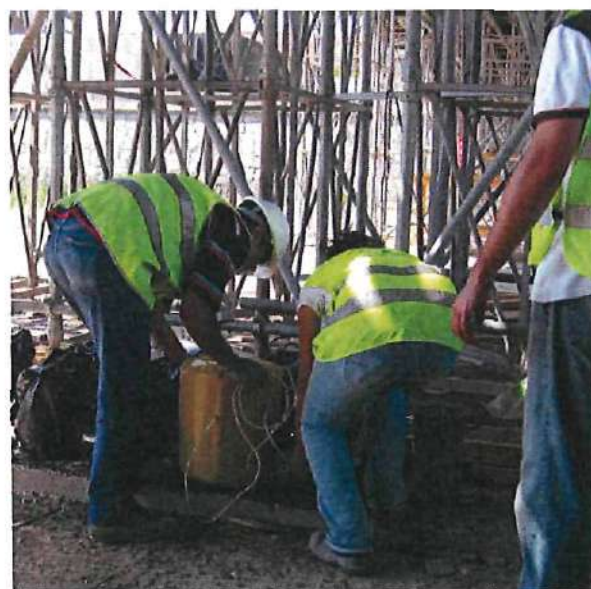
$$M = \sum (T - T_0) \Delta t$$

De esta forma, se estimó la resistencia a la rotura a compresión en las primeras 24 horas de fraguado a través de la aplicación del equipo de madurez. A las 23 horas, se obtuvieron más de 25 MPa en las dos pasarelas. Por lo que se pudo adelantar el desencofrado de las pasarelas.

Posteriormente y para diferentes intervalos de tiempo se fueron rompiendo las probetas fabricadas de 15X30 cm.



Fig. 24. Equipo
madurez.



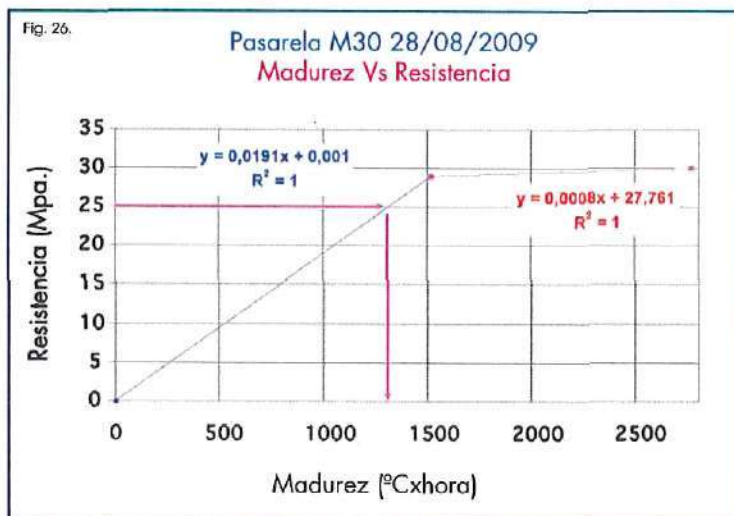
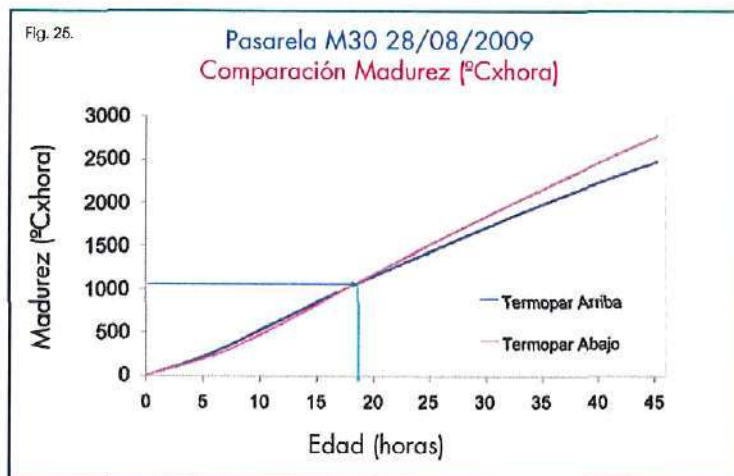


Tabla 3.			
Probeta	Peso (kg)	Carga (Tm)	Resistencia (MPa)
P1	12.745	53.20	30.10
P2	12.600	49.21	27.85

En la tabla 3 se muestran dos ejemplos de dos valores de resistencia obtenida a la rotura a compresión a 23 horas de edad.

En la fig. 25 e muestran las curvas de madurez obtenidas.

Así mismo, a partir de la figura 25 y con los valores de resistencia, se puede mostrar la tendencia de la resistencia respecto a la madurez del hormigón (Fig. 26).

Ambas figuras indican, mediante flechas, el valor en unidades de madurez (1200 aproximadamente) necesarias para alcanzar en un tiempo determinado (20 Horas, menos de un día) la resistencia de diseño (25 MPa) exigida del proyecto para descimbrar la estructura (Pasarela).

7. Conclusión

Como resultado de los ensayos realizados y del control llevado a cabo en planta y a pie de obra los días del hormigonado de las pasarelas, se obtuvo un HAC homogéneo con la reología óptima para fluir sin segregar y rellenar el interior del doble encofrado, y con buen acabado superficial final. En cuanto a las



Fig. 27. Desencofrado superior.



Fig. 28. Desencofrado inferior.

Fig. 29.
Imágenes del
acabado final
de la pasarela.



resistencia a la rotura a compresión, en las dos pasarelas se cumplieron con los requerimientos exigidos por la dirección de la obra. Debido a la aplicación de la tecnología del control de madurez, se pudo adelantar el desencofrado y posterior descimbrado de las pasarelas.

Es importante indicar que la aplicación de estas tecnologías innovadoras en el campo de los hormigones no se podría haber realizado sin el apoyo y la colaboración de todo el equipo del Ayuntamiento de Madrid del Área de Proyectos Singulares así como

gracias a la colaboración del equipo de arquitectos de MRIO, en especial a Ginés Garrido, Director del Proyecto. También es importante agradecer su colaboración a FHECOR, en especial a Hugo Corres, Ingeniero de Caminos responsable de cálculo estructural del proyecto. Por ello queríamos agradecerles a todos ellos desde la redacción de este artículo tanto la ayuda prestada como los consejos y las directrices que nos han marcado en todo momento ya que sin ellas difícilmente se hubieran podido aplicar estas tecnologías con el éxito obtenido. ♦

Referencias:

1. Directrices Europeas para el Hormigón Autocompactante, Febrero 2006
2. EHE. Anejo 17
3. Estimates of self-compacting concrete 'potential' durability, Stéphan Assié, Gilles Escadellias, Vincent Waller
4. Hormigón autocompactante. Criterios para su utilización. Manuel Burán Maestro, Jaime Fernández Gómez, Luis Garrido Romero
5. Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a Self Compacting Concrete (SCC) L. D'Alola Schwartzentruber, R. Le Roy, J. Cordin
6. Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies, P.L. Domone
7. Properties of self-consolidating concrete containing type f fly ash, Raissa P. Douglas
8. Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete, Burak Feleko Ju, Selçuk Türkel, Bülent Baradan
9. Hormigón, M. Fernández Cánovas
10. A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete, Liberato Ferrara, Yon-Dong Park, Surendra P. Shah
11. Workability of Self-Compacting Concrete, Chiara F. Ferraris, Lynn Broker, Celik Ozyildirim, Joseph Daczko
12. The effect of measuring procedure on the apparent rheological properties of self-compacting concrete, Mette R. Gelker, Mari Brandt, Lars N. Thrane, Dirch H. Bager, Olafur Wallevik
13. Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume, Mehmet Geso Ju, Erhan Güneylisi, Erdan Özboy
14. The Effect of Admixtures in Concrete Containing Manufactured Sand, Mark James Kinkne
15. A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete, P.L. Domone
16. La influencia del filler calizo en las propiedades del hormigón Autocompactante, I. Pajares, M.I. Sánchez de Rojas, M.Frías, J. Barbara
17. Homogeneity of self-compacting concretes used in tunnel strengthening - A case study, Xavier Pintado, Bryan E. Borragón
18. New methodology for designing self-compacting concrete, Saak, A.W., Jennings, H. y Shah, S.
19. Molecular structure and dispersion-Adsorption mechanisms of comb-type superplasticizers used in Japan, Etsuo Sakai, Kazuo Yamada and Akira Ohta
20. Criterios de diseño para el hormigón autocompactable, Ana Carolina P. dos Santos, Antonio Aguado, Luis Agulló y Tomás García
21. High strength self-compacting concrete. Original solutions associating organic and inorganic admixtures, M. Sari, E. Prat, J. -F. Labastie
22. Permeation properties of self-compacting concrete, Wenzhong Zhu, Peter J. M. Bartos
23. The maturity method: Modifications to improve estimation of concrete strength at later ages, Yohia A. Abdel-Jawad
24. Compressive strength development of concrete with different curing time and temperature, J.-K. Kim, I* Y.-H. Moon,* and S.-H. Eo†